

고온용융물과 콘크리트간의 반응(MCCI): MK1실험결과

노기만, 김종환, 김상백

한국원자력연구소

신기열, 정 모

영남대학교 기계공학과

요 약

원자력 발전소에서의 중대사고시, 고온의 노심 용융물이 원자로 공동으로 떨어지면 노심용융물과 콘크리트간의 반응(MCCI)에 의한 여러가지 현상으로 인해 격납용기의 건전성을 위협할 수 있다. 본 연구에서는 노심 용융물의 모사체로 고온의 Thermite 20kg을 영광 원자력 발전소 3, 4호기에 사용된 콘크리트 시편에 부어 중대사고시 MCCI 현상을 모사하였다. 실험에서는 국내 콘크리트에서의 침식율, 가스 및 입자 발생률을 측정하였다. 실험에서 측정된 용융물의 최고 온도는 약 2230 °C이고, 콘크리트 시편으로의 최대 하부 열유속은 초기에 약 1.1~1.3 MW/m²로 나타났으며, 전체적인 콘크리트의 침식 깊이는 약 15mm 그리고 초기의 최대 침식율은 129 cm/hr로 나타났다. 향후에 이 실험 결과를 MELCOR 코드의 MCCI 해석 모듈인 CORCON-MOD3의 해석 결과와 비교할 예정이다.

1. 개요

원자력 발전소의 중대사고시 원자로 용기가 파손되어 고온의 용융물이 격납용기 하부 캐비티 바닥 콘크리트면(basemat)과 반응하면 침식(erosion) 및 가연성 가스(H₂), 불활성 기체, 핵분열 생성물을 발생시켜 결과적으로 격납용기 내부의 압력을 증가시켜 그 건전성을 위협하게 된다. 이러한 노심 용융물과 콘크리트와의 반응 현상에서 용융물과 콘크리트의 종류, 수증기의 화학적 반응으로 생성된 가스의 종류와 상대적 양, 캐비티 바닥면의 침식속도 등은 안전한 격납용기 설계 및 캐비티 바닥면 두께와 면적 결정에 매우 중요한 기초자료가 된다.

1980년대 중반 이후로 미국 SNL^[1,2,3,4,5] 과 독일 FZK^[6]는 자국의 발전소 시설에 사용되는 콘크리트인 Basaltic(BAS) 과 Limestone Common Sand(LCS) 에 대해 용융 상사물(SUS304, Mild steel, UO₂-ZrO₂ -Zr, Fe+Al₂O₃)을 사용하여 콘크리트의 침식율, 방출 가스의 종류와 상대적인 생성량, 상부와 하부로의 열유속 등을 측정하였다. 현재까지 진행되는 MCCI 실험의 주요 목적은 용융물 상부에 냉각수가 존재할 때, Floating Crust가 열전달에 미치는 영향과 MCCI 현상을 다루는 WECHSL^[6], CORCON^[7], VANESA^[8] 코드를 개선시키는 것이다. 미국 ANL의 ACE^[9,10], MACE^[11,12] 실험은 용융물 상부에 물을 주입하여 용융물의 냉각현상을 실험하고 있다.

본 실험은 대형 실험을 위한 예비실험으로서 콘크리트 성분이 Basaltic에 가까운 국내 원전 영광 3,4 호기의 콘크리트 시편에 대해 용융상사물로 thermite 20 kg을 사용하여 반응을 모사하였고, 그 결과는

다량의 용융산화물을 이용할 대형 실험 연구의 기초자료로 사용될 것이다. 실험에서는 바닥 및 벽면으로의 콘크리트의 침식율, 생성가스 종류 및 상대적인 양을 측정하고 또한 상·하부의 열 유속을 계산하여 국내 원전용 콘크리트의 반응특성을 규명하고 중대사고 해석코드의 개선을 통해 차세대 원전 캐비티 설계 개선안을 위한 자료로 활용될 예정이다.

2. 실험 장치

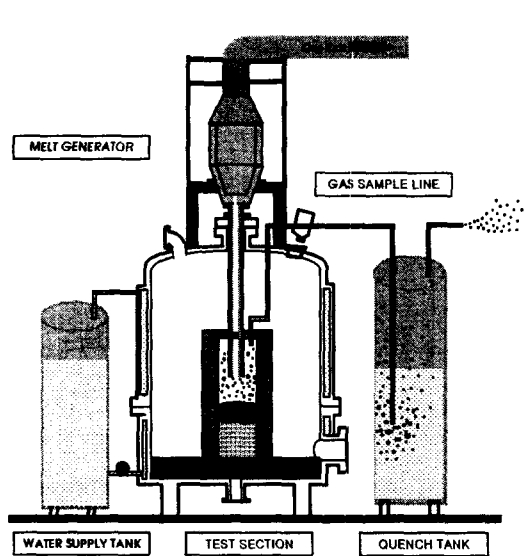


Fig. 1 MCCI experimental facility.

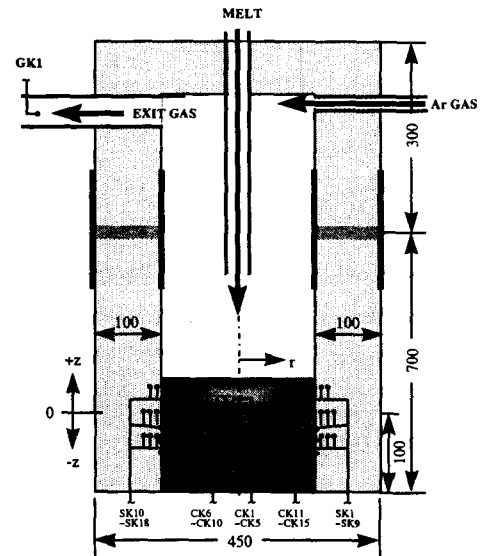


Fig. 2 Locations of thermocouples within concrete cylinder.

본 연구는 실험실에 설치된 대형 실험용 알루미늄 격납용기(지름 1.24 m, 높이 1.5 m)를 이용한 실험(이하 'MK1 실험'이라 칭함)결과이다. MK1 실험은 대형격납용기 내부에서 수행하는 1차원 반응 모사 실험으로 thermite 20 kg을 사용하였으며, 반응용기는 상, 하부의 두개로 이루어져 있다. 그림 1은 실험장치를 나타낸 것이다. 반응용기는 미국 Allied Mineral Products 사의 순도 95%, Grain size 6 Mesh(4mm)인 MINRO-AL CAST 알루미늄을 이용하여 하부용기는 내경 240 mm, 두께 100 mm, 높이 700 mm, 상부용기는 내경 250 mm, 두께 100 mm, 높이 300 mm의 원통형으로 제작, 조립하여 사용하였다. 용기 하부에는 영광 3 & 4호기에 사용된 콘크리트 재료를 200 mm 두께로 양생시켜 시편을 만들었다. 용융상사물은 자체 제작한 도가니를 이용하여 약 20 kg의 thermite 혼합물을 사용하여 산화용융물 ($Fe+Al_2O_3$)을 생성시켰다. 반응용기 콘크리트 바닥과 알루미늄 벽면에는 반응시 온도변화와 열유속 및 침식율을 측정하기 위해 K-type 열전대(Chromega vs. Alomega)를 축방향으로 15개, 반경방향으로 18개씩 설치하였다. 용융물의 온도를 측정하기 위해 콘크리트 하부 중앙에는 C-type 열전대 (Tungsten 5% Rhenium vs. Tungsten 26% Rhenium)를 표면에서 20 mm 돌출되게 설치하였다. 실험시편과 각 열전대의 위치는 그림 2에서 보는 바와 같다. 측정된 데이터는 PC와 Hardware로 구성된 자료처리 장치로 전송되어 저장되며 자료처리용 Hardware는 FLUKE사의 NetDAQ를 이용하였다. 이것은 20 채널 용량으로 초당 최소 6 개, 최대 1000 개의 데이터 처리속도와 0.6 °C 의 열전대 정밀도를 가지는 것으로 모두 2대(2640A, 2645A)로 이루어져 있다. 데이터 로고는 윈도우상에서 손쉽게 데이터를 처리할 수

있도록 소프트웨어로 구동하며 측정된 데이터는 Dynamic Data Exchange 기능을 이용하여 MS Excel 화면에서 온도변화를 살펴볼 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 금속용융물의 양이 20 kg 으로 기존의 상용 용융물 생성 도가니(5 kg 용량)보다 큰 것을 직접 제작하여 사용하였으며 대형 격납용기를 이용한 실험을 위한 생성용융물 주입용 이송채널도 제작, 설치하여 사용하였다. 용융물 생성 도가니는 내경 400 mm, 높이 450 mm, 두께 3 mm의 스테인레스강판 틀 내부에 두께 50 mm의 알루미늄을 양생시키고 하부는 높이 150 mm까지 용융물의 주입이 손쉽게 되도록 원추형으로 되어 있으며 최고 40 kg의 thermite분말을 녹일 수 있도록 제작하였다. 이송채널은 내경 120 mm, 두께 5 mm, 길이 1200 mm의 스테인레스 강판 틀내부에 두께 30 mm의 알루미늄을 양생시켜 사용하였다. 반응용기 상부 두께에는 생성되는 H₂, H₂O, CO, CO₂ 가스의 측정을 위해 포집장치와 10 Stage 임팩터가 장착된 입자분석기(Aerosol Particle Analyzer)를 설치하였다. 반응용기에서 생성되는 폭발성 수소 가스를 회색시키면서 검출용 carrier 가스로 쓰이는 아르곤(Ar)가스가 반응용기 상부에서 일정유량 공급되어 반응용기내의 공기를 제거하고 이와 함께 MCCSI시 발생하는 기체가 동관을 통해 흘러가도록 하여 포집한다. 포집한 기체는 가스분석기(Gas Chromatograph)를 통해 그 종류 및 발생량의 상대적인 양을 분석한다.

3. 실험결과 해석

본 실험에서는 고온의 금속 용융물과 콘크리트의 반응시 측정된 온도 Data를 이용하여 그 경계면에서의 침식율과 열유속 등을 계산한다. 콘크리트의 침식은 내부에 설치되어 있는 각 열전대(K-type)의 온도변화로 예측할 수 있으며 온도가 1645 K에 도달하게 되면 K-type 열전대는 파손하게 된다. 이러한 열전대의 파손은 콘크리트의 침식으로 고온 용융물이 접촉하였음을 의미한다. 콘크리트의 침식면을 결정하는 침식온도는 각 콘크리트의 종류에 따라 다르게 나타나며 국내원전용 콘크리트에 대한 자료는 아직 없는 상태이다. 침식과정 동안 하부로의 열유속은 경계면이 침식함에 따라 하부로 진행되는 침식속도에 비례하여 변화하며 침식이 중단한 후에는 고체 면으로 전도를 통해 열이 전달된다. 따라서 경계면에서 열전달량을 해석하기 위해 침식이 준정상상태로 이루어지는 것으로 가정하여 그림 3에서와 같은 이동경계면 모델을 정의하였다. 침식면 u 를 포함하는 s 와 v 면으로 이루어진 검사체적에 대한 1차원 에너지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[13].

$$\begin{aligned}
 q_s &= m(h_s - h_v) + q_v \\
 &= m(h_{fs} + h_u - h_v) + q_v \quad \dots\dots\dots (1) \\
 &= m(h_{fs} + c_p(T_u - T_v)) + q_v
 \end{aligned}$$

여기서, q_s 는 경계면 s 에서의 열유속[W/m²]을 나타내며 m 은 침식에 따른 질량유속[kg/m²s], h_s , h_u , h_v 는 각각 s , u 및 v 면에서의 엔탈피[J/kg], h_{fs} 는 콘크리트의 용융잠열[J/kg], C_p 는 콘크리트의 비열[J/kgK], q_v 는 경계면 v 에서의 열유속을 나타낸다. 질량유속은 밀도와 콘크리트의 침식속도 dz/dt 의 곱으로 나타낼 수 있으며, 침식층 s 와 u 에서의 엔탈피 차이는 침식 콘크리트의 용융잠열로 볼 수 있다.

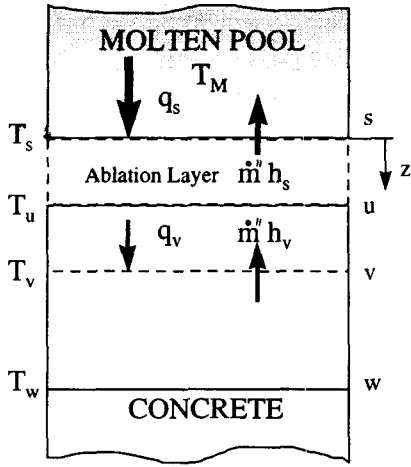


Fig. 4 One-dimensional ablation model.

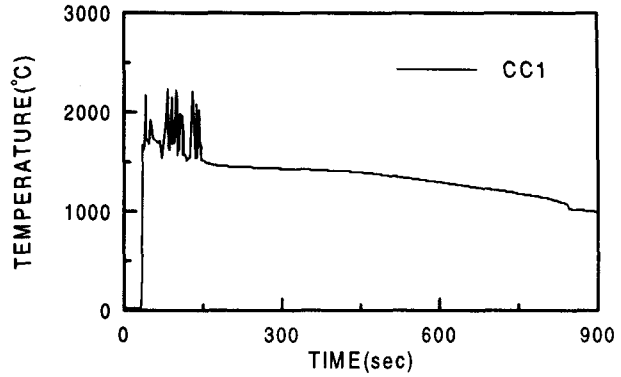


Fig. 5 Temperature data of the melt by C-type thermocouple.

콘크리트의 침식표면에서의 온도 T_u 는 콘크리트의 침식온도 T_{ab} 로 정의하면 열유속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_s = \rho \frac{dz}{dt} \Big|_{s-v} (h_{fs} + c_p (T_{ab} - T_v)) + q_v \quad \dots\dots\dots (2)$$

침식이 콘크리트의 v 단면까지 이루어진 후 중단하게 되면 침식속도가 0가 되므로 하부방향으로의 열전달은 단순히 콘크리트로의 전도에 의해서만 이루어진다고 볼 수 있으며 그 양은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_s = q_v = -\kappa \frac{dT}{dz} \Big|_{v-w} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서 κ 는 콘크리트의 열전도 계수[W/mK]이다. 실험에서 시편으로 사용된 국내 원전용 콘크리트의 성질은 Basaltic 에 가까우며 상변화잠열의 경우는 LCS에서의 값과 비슷하므로 결과 해석에 사용된 콘크리트의 물성치들은 참고문헌^{2, 5, 7)}을 참조하여 용융물의 침식온도는 $T_{ab} = 1450 \text{ K} = 1177 \text{ }^\circ\text{C}$, 밀도는 $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$, 비열은 $C_p = 880 \text{ J/kgK}$, 열전도계수는 온도에 따른 함수로 $\kappa = -0.0012 \text{ T} + 2.4 \text{ W/mK}$, 용융잠열은 $h_f = 5 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 의 값으로 계산에 사용하였다.

4. 실험 결과

MK1 실험은 대형 알루미늄 격납용기 내에서 수행되는 첫 번째 실험으로서 국내 원전용 콘크리트 시편의 1차원 하부 침식을 알아보고 격납용기의 냉각 시스템(Water jacket) 및 기체 배출관의 성능 시험을 통해 추후 수행될 용융물의 지속가열 실험 및 냉각수 주입 실험에 가동시킬 시스템을 점검하기

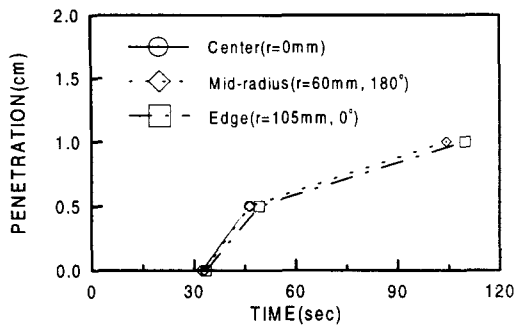


Fig. 5 Concrete erosion front in the MK1 test.

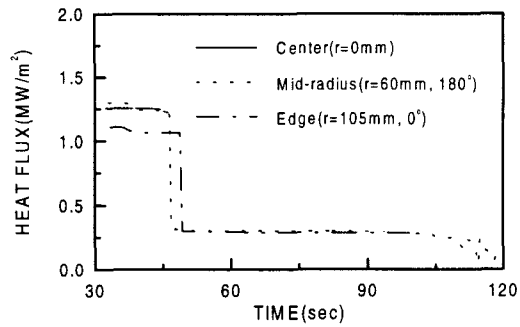


Fig. 6 Heat flux to the concrete in the MK1 test.

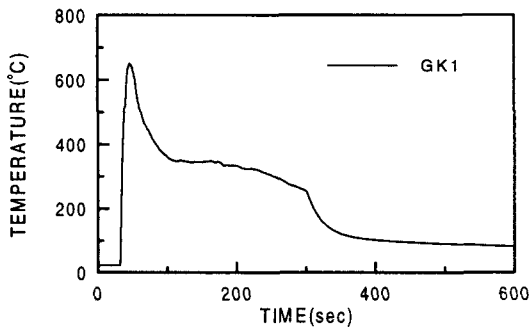


Fig. 7 Gas temperature data at the exit.

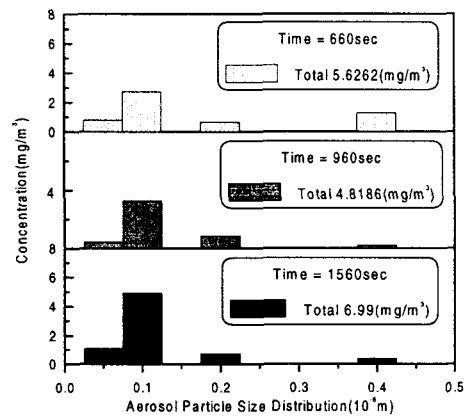


Fig. 8 Aerosol particle size distribution with respect to time in MK1 test.

위한 것이 목적이다. 본 실험에서도 용융물의 온도를 측정하기 위해 C-type 열전대가 시편 중앙에서 콘크리트 표면 20 mm 상부에 MgO로 10 mm 두께로 덮여 설치되어 있고 하부 방향으로 K-type 열전대가 5 mm 간격으로 5개씩 반경방향으로 모두 15개가 설치되어 있다. 그림 4는 용융물의 온도를 측정하기 위해 설치한 C-type 열전대에서의 온도변화를 보여 준다. 초기에 급격한 온도 상승으로 약 2200 °C 에서 열전대가 파손되었으나 시간이 지남에 따라 열전대의 junction이 고온의 용융물에 의해 다시 생겨 최고 2230 °C 까지 측정하였으며 후반부에서의 용융물의 온도를 잘 나타내주고 있다. 콘크리트 하부로의 시간별 침식 위치는 그림 5에 나타나 있으며 최대 침식율은 초기에 약 129 cm/hr, 침식 말기에 약 31 cm/hr로 나타났으며, 콘크리트의 침식은 10 ~ 15 mm 정도로 나타났다. 그림 6은 콘크리트 하부로의 열유속을 나타낸 것이며 최대 열유속은 초기에 1.1 ~ 1.3 MW/m²로 나타남을 알 수 있다. 반응용기 상부에 설치된 배출구로 나오는 기체의 온도는 그림 7에서 보듯이 용융물이 떨어진 후 약 15초 동안 급격히 상승하여 최고 650 °C 까지 도달한 후 서서히 감소하였다. 본 실험에서는 용융물이 콘크리트 위에 떨어진 후 660초 부터 기체포집 및 에어로졸 입자 분석을 시작하였다. 시간에 따른 에어로졸 입자의 크기의 변화는 그림 8에 나타난 바와 같으며 그 크기는 0.05 ~ 0.4 μm 로 TURC 실험^[2]에서의 측정결과에 비해 보다 작은 입자들이 많이 방출되었음을 알 수 있다. 그러나 기체 분석에서는 기대했던 H₂, CO, CO₂의 정량적인 분석자료를 얻을 수 없었는데, 이는 반응기체가 콘크리트가 침식 과정동안 발생하는데 반해 기체 채취가 콘크리트의 침식이 끝난지 거의 500초 후에 이루어졌기 때문이다. 이는 본 실험이 자연 냉각되는 실험으로, 용융물이 콘크리트와 접촉하자 단시간내에 식기 때문에, 콘크리트

침식을 유발할 수 있는 시간이 짧기 때문이라 판단되며, 추후 용융물 지속가열 실험에서는 이들 기체의 성분을 측정할 수 있으리라 판단된다. 참고로 콘크리트가 이산화탄소를 방출시키기 시작하는 온도는 700 °C이다^[5].

5. 결론

국내원전용 콘크리트의 노심용융물에 의한 반응실험에서 콘크리트의 침식량과 침식율 및 열유속은 용융물의 양과 초기온도에 크게 지배를 받으며 실험에서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) Thermite 반응에서 얻은 용융물의 최고측정온도는 2230 °C 이다.
- 2) 20 kg 의 thermite를 이용한 실험에서 발생 한 콘크리트의 침식량은 약 15 mm정도이고 반응 초기의 최대침식율은 129 cm/hr 으로 나타났다.
- 3) 하부열유속은 초기에 최대 1.1 ~ 1.3 MW/m² 으로 나타났다.
- 4) 입자분석결과 TURC1실험에서 보다 작은 입자들이 많이 발생하였다.
- 5) 반응가스의 분석에서 CO₂와 CO 가스가 검출되었으나 검출량이 미소하여 상세한 측정 및 분석이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Copus, E. R. and Bradley, D. R., 1986, NUREG/CR-4558, SAND85-1739, R5, R7.
- [2] Gronager, J. E., Suo-Antilla, A. J., Bradley, D. R. and Brockmann, J. E., 1986, NUREG/CR-4420, SAND85-0707 R5, R7 and 1986, NUREG/CR-4521, SAND86-0318 R5, R7.
- [3] Tarbell, W. W., Bradley, D. R., Blose, R. E., Ross, J. W. and D. W. Gilbert, 1987, NUREG/CR 3024, SAND82-2476 R3, R4.
- [4] Blose, R. E., Gronager, J. E., Suo-Antilla, A. J. and Brockmann, J. E., 1987, NUREG/CR4727, SANDS85-1546 R3, R4, R7.
- [5] Copus, E. R., Blose, R. E., Brockmann, J. E., Gomez, R. D. and Lucero, D.A., 1987, NUREG/CR-4994, SAND87-2008, R3, R4, R7 and Lee, M. and Bari, R. A., 1988, OECD/NEA, CSNI Report, No. 155, Vol. 2.
- [6] Alsmeyer, H., 1987, Nuclear Engineering and Design, Vol. 103, pp. 115~125 and Alsmeyer, H. et al., 1987, "BETA Experimental Results on Melt/Concrete Interactions: Silicate Concrete Behavior," Proc. of the Committee on the Safety of Nuclear Installations(CSNI) Specialists Meeting on Core Debris-Concrete Interactions, EPRI, NP-5054-SR.
- [7] Bradley, D. E. et al., 1993, NUREG/CR-5843, SAND92-0167.
- [8] Power, D. A. et al., NUREG/CR-4308, SAND85-1370.
- [9] Thompson, D. H. et al., 1992, Proc. of the 2nd OECD (NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interaction, KfK 5108, NEA/CSNI/R (92), pp. 97~110.
- [10] Fink, J. K. et al., 1995, High Temperature and Materials Science, Vol. 33, pp. 51~75.
- [11] Spencer, B. W. et al., 1992, Proc. of the 2nd OECD (NEA) CSNI Specialists Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interaction, KfK 5108, NEA/CSNI/R(92), pp. 357~372.
- [12] Farmer, M. T. et al., 1992, "MACE Core Coolability Test M1B," 20th Water Reactor Safety Meeting, Bethesda, MD.
- [13] Anthony. F. Mills, "Heat Transfer", Irwin, 1992.